

**Fiber-laser sensor for measurement of elongation, temperature or especially isotropic pressure in oil well**

Patent Number: DE19807891  
Publication date: 1999-08-26  
Inventor(s): BOHNERT KLAUS (CH); BRAENDLE HUBERT (CH)  
Applicant(s): ABB RESEARCH LTD (CH)  
Requested Patent: ☐ DE19807891  
Application Number: DE19981007891 19980225  
Priority Number(s): DE19981007891 19980225  
IPC Classification: G01L11/02; G01D5/28; E21B47/06; G02B6/124  
EC Classification: G01D5/353, G01L11/02B  
Equivalents: AU1746999, BR9908236, ☐ EP1060372 (WO9944023), NO20003406,  
☐ WO9944023

**Abstract**

The fiber-laser pressure sensor (1) has a sensor fiber (5, 5a, 5b) of rotationally asymmetrical structure located between the end reflectors (4a, 4b) of the fiber-laser (2). An Independent claim is also included for a fiber-laser sensor (1) used especially for elongation or temperature measurement, comprising a double-refractive, preferably two-mode sensor fiber (5, 5a, 5b) located between the end reflectors (4a, 4b) of the fiber-laser (2).

Data supplied from the esp@cenet database - I2

[illegible]



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 198 07 891 A 1**

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 L 11/02**  
G 01 D 5/28  
E 21 B 47/06  
G 02 B 6/124

21 Aktenzeichen: 198 07 891.9  
22 Anmeldetag: 25. 2. 98  
43 Offenlegungstag: 26. 8. 99

DE 198 07 891 A 1

- 71 Anmelder:  
ABB Research Ltd., Zürich, CH
- 74 Vertreter:  
Lück, G., Dipl.-Ing. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 79761  
Waldshut-Tiengen
- 72 Erfinder:  
Bohnert, Klaus, Niederrohrdorf, CH; Brändle,  
Hubert, Oberengstringen, CH
- 56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:
- |    |              |
|----|--------------|
| DE | 34 06 096 C2 |
| DE | 32 27 083 C2 |
| DE | 43 22 291 A1 |
| CH | 6 58 296 A5  |
| US | 55 15 459    |
| US | 53 09 540    |
| US | 52 08 877    |

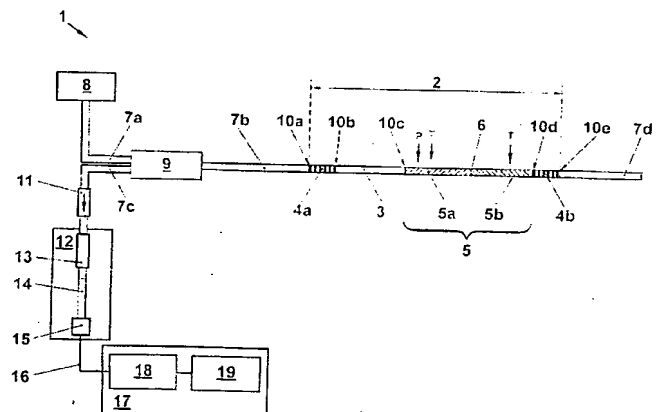
US 51 44 690  
US 49 29 050  
US 45 42 647  
WO 96 17 225 A2

BOCK, Wojtek J., URBANCZYK, Waclaw:  
Temperature-  
hydrostatic pressure cross-sensitivity effect  
in elliptical-core, highly birefringent fibers.  
In: Applied Optics, 1. Nov. 1996, Vol.35, No.31,  
S.6267-6270;  
KERSEY, Alan D., et.al.: Fiber Grating Sensors.  
In: Journal Of Lightwave Technology, Vol.15,  
No.8, Aug. 1997, S.1442-1463;  
TSAI, Kun-Hsieh, et.al.: General Solutions for  
Stress-Induced Polarization in Optical Fibers.  
In: Journal Of Lightwave Technology, Vol.9,  
No.1, Jan. 1991, S.7-17;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Faserlaser-Drucksensor

- 57 Die vorliegende Erfindung hat einen frequenzkodierten  
Faserlaser-Drucksensor 1 zum Gegenstand, der insbeson-  
dere zur Messung isotroper Drücke in Erdölbohrlöchern  
geeignet ist. Das erfindungsgemäße Sensorprinzip be-  
ruht darauf, daß in einem Er<sup>3+</sup>-dotierten Faserlaser 2 eine  
ein- oder zweimodige Sensorfaser 5, 5a, 5b angeordnet  
ist, deren druckabhängige Doppelbrechung zu einer Fre-  
quenzverschiebung und zu Schwebungsfrequenzen zwi-  
schen den orthogonalen linearen Polarisationsmoden x, y  
oder Raummoden LP<sub>01</sub> und LP<sub>11</sub>gerade führt. Die Schwe-  
bungsfrequenzen sind auf einfache Weise mit einem Fre-  
quenzzähler 19 meßbar. Temperaturbedingte Doppelbre-  
chungsvariationen werden in einer differentiellen Anor-  
dnung zweier Sensorfasersegmente 5a, 5b kompensiert.  
Als Laserendreflektoren sind besonders Faser-Bragg-Git-  
ter 4a, 4b mit geringen Bandbreiten (0,2 nm) geeignet.  
Der Drucksensor 1 zeichnet sich durch einen großen Meß-  
bereich (100 Mpa) und hohes Auslösungsvermögen (kPa)  
aus, ist einfach multiplexierbar und kann in einem sehr  
kompakten, leichtgewichtigen und robusten Druckgehäu-  
se 25 verpackt werden.



REFERENCE COPY

PCT/US 99/30282

DE 198 07 891 A 1

## TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der optischen Druckmessung. Sie geht aus von einem faseroptischen Laser nach dem Oberbegriff der Ansprüche 1 und 12.

## STAND DER TECHNIK

Bei der Erdölförderung müssen Bohrlöcher hinsichtlich Druck und Temperatur überwacht werden. Im Bohrloch können die Flüssigkeitsdrücke bis zu 100 MPa (1000 bar) und die Temperaturen bis zu über 200°C betragen. Zur Druckmessung bis zu ca. 170°C werden häufig elektrische Sensoren eingesetzt, wie z. B. Piezowiderstände, piezoelektrische Elemente, kapazitive Sonden oder Kristallresonatoren. Bekannt ist auch die Verwendung optischer Drucksensoren, die sich durch gute Hochtemperaturtauglichkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektromagnetische Störungsempfindlichkeit auszeichnen. Beispiele hierfür sind mechanische Resonatoren, die optisch aktiviert und optisch ausgelesen werden, elastooptische Sensoren, optische Sensoren mit druckempfindlicher Membran oder Fabry-Perot Resonatoren.

Polarimetrische Faser-Laser Sensoren sind z. B. aus dem Artikel von H. K. Kim et al., "Polarimetric fiber laser sensors", Optics Letters 18 (4), S. 317-319 (1993) bekannt. In einer Nd-dotierten Faser mit rundem Kern und dichroitisch verspiegelten, für Pumplicht transparenten Enden werden ein oder mehrere longitudinale Moden zum Lasen gebracht. Durch unidirektionalen seitlichen Druck wird in der Faser Doppelbrechung erzeugt und eine Frequenzverschiebung zwischen den orthogonalen Eigenpolarisationen der longitudinalen Moden induziert. Im ausgekoppelten Strahl werden die Eigenpolarisationen von einem linearen Analysator zur Interferenz gebracht und das resultierende Schwebungssignal mit einer Photodiode detektiert. Die Schwebungsfrequenz kann sehr einfach mit einem Frequenzzähler gemessen werden. Sie stellt ein hochpräzises Maß für den unidirektionalen Druck auf den Faser-Laser dar. Hydrostatische Drücke können jedoch in dieser Anordnung nicht gemessen werden.

In dem Artikel von G. A. Ball et al., "Polarimetric heterodyning Bragg-grating fiber-laser sensor", Optics Letters 18 (22), S. 1976-1978, wird ein ähnlich aufgebauter Dehnungssensor vorgestellt. Anstelle der beiden Spiegel werden zur Begrenzung der Laserkavität zwei direkt in den Faserkern geschriebene Bragg-Gitter verwendet. Wegen der geringen Kavitätslänge von 2,5 cm und der schwachen Elliptizität des Faserkerns sind genau zwei orthogonal polarisierte Longitudinalmoden mit einer relativ niedrigen, gut meßbaren Schwebungsfrequenz anregbar. Mit einem solchen Faser-Laser Sensor ist jede veränderliche Größe meßbar, welche eine Variation der Länge oder Doppelbrechung der Laserkavität bewirkt. Absolutmessungen z. B. eines Drucks sind aber schwierig oder unmöglich, da Temperaturschwankungen, Änderungen optischer Parameter durch Materialermüdung u. ä. den Arbeitspunkt, d. h. die Schwebungsfrequenz im unbelasteten Zustand, willkürlich verschieben können.

In der Veröffentlichung von J. P. Dakin et al., "Compensated polarimetric sensor using polarisation-maintaining fibre in a differential configuration", Electronic Letters 20 (1), S. 51-53 (1983) wird ein passiver faseroptischer Sensor gezeigt, der aus zwei identischen, um 90° verdrehten und zusammengespießten Teilstücken einer polarisationserhaltenden Faser besteht. Ein Teilstück wird der Meßgröße, z. B.

Temperatur, Dehnung oder akustischen Wellen, und beide Teilstücke der isotropen Störgröße, z. B. allseitigem Druck oder Temperatur, ausgesetzt. Diese differentielle Anordnung ist auch besonders gut mit niederkohärenten Halbleiterlasern kompatibel, weil das durch Phasenrauschen der Lichtquelle verursachte Intensitätsrauschen weitgehend kompensiert ist. Die Detektion des interferometrischen, periodischen Signals ist allerdings wesentlich aufwendiger als die Detektion frequenzkodierter Signale von aktiven Faserlaser Sensoren.

Seriell Multiplexen passiver Faser-Bragg-Gitter Sensoren ist z. B. aus dem U. S. Pat. No. 4,761,073 bekannt. Entlang einer Sensorfaser sind mehrere Bragg-Gitter mit unterschiedlichen Reflexionswellenlängen eingeschrieben. Durch Messung der Verschiebungen der Reflexionswellenlängen sind die Dehnungen an den Orten der Bragg-Gitter bestimmbar. Thermisch induzierte Gitterdehnungen können mit Hilfe superponierter Gitter unterschiedlicher Reflexionswellenlängen eliminiert werden. Bekanntermaßen ist die Ortsbestimmung statt durch wellenlängenselektive auch durch zeitaufgelöste Messungen mit einer gepulsten Lichtquelle möglich. Bei der Dehnungsmessung mit Bragg-Gittern ist der Meßbereich aufgrund der Faserbruchgefahr eingeschränkt. Darüberhinaus sind Bragg-Gitter zur Messung hydrostatischer oder isotroper Drücke weitgehend ungeeignet bzw. extrem unempfindlich.

In dem Artikel "Perturbation Effects on Mode Propagation in Highly Elliptical Core Two-Mode Fibers" von S.-Y. Huang et al. wird aufgezeigt, daß in einer polarisationserhaltenden Zweimodenfaser durch homogenen, allseitigen oder radialen Druck, aber auch durch axiale Dehnung, Verdrehung und Temperatur, eine Phasenverschiebung sowohl zwischen den Polarisationsmoden als auch zwischen den räumlichen Moden erzeugbar ist.

## DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Faserlaser-Sensor anzugeben, welcher zur frequenzkodierten Messung von isotropen Drücken, Dehnungen oder Temperaturen geeignet ist und sich durch einen großen Meßbereich, einen einfachen Aufbau und einfache Multiplexierbarkeit auszeichnet. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Anspruchs 1 und 12 gelöst.

Kern der Erfindung ist es nämlich, in der Laserkavität eines Faserlasers neben einer als Lasermedium wirkenden dotierten Faser eine Sensorfaser mit einer nicht rotationssymmetrischen Struktur anzuordnen, in welcher durch allseitigen Druck eine Doppelbrechung und eine druckproportionale Schwebungsfrequenz zwischen unterschiedlichen Polarisationsmoden oder räumlichen Moden induzierbar ist.

Ein Ausführungsbeispiel zeigt den optischen Aufbau eines Faserlaser-Drucksensors mit einer temperaturkompensierten Sensorfaser, die aus zwei um 90° zueinander verdrehten Fasersegmenten besteht. Im differentiellen Betrieb werden beide Segmente der Störgröße, z. B. der Temperatur, und nur ein Segment der Meßgröße, z. B. dem Druck, ausgesetzt.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel stellt eine serielle Anordnung mehrerer Faserlaser-Drucksensoren mit unterschiedlichen Emissionswellenlängen dar, die über eine gemeinsame Pumplichtquelle gespeist werden und deren druckproportionale Schwebungsfrequenzen wellenlängenselektiv detektiert werden.

Andere Ausführungsbeispiele betreffen Druckgehäuse für Faserlaser, bei denen die laserverstärkende Faser und ein Sensorfasersegment in einer Kapillare oder Kammer unter Niederdruckgas oder Vakuum stehen und ein Sensorfaser-

segment mit dem zu messenden Medium in Druckkontakt steht.

Zusätzliche Ausführungsbeispiele ergeben sich durch Kombination erfindungswesentlicher Merkmale und aus den abhängigen Ansprüchen.

Ein wichtiger Vorteil des erfindungsgemäßen Faserlaser-Drucksensors besteht darin, daß mit dem frequenzkodierten Drucksignal eine hohe Meßgenauigkeit, ein großer Druckmeßbereich bis zu 100 MPa und eine gute Eichbarkeit auf Absolutdrücke erzielbar sind.

Ein wesentlicher Vorteil des Faserlaser-Drucksensors besteht auch darin, daß die Parameter der Verstärker- und Sensorfaser unabhängig voneinander optimierbar sind. Insbesondere sind kommerziell erhältliche, Erbium-dotierte Verstärkerfasern und Zweimoden-Sensorfasern mit elliptischem Kern verwendbar.

Ein weiterer Vorteil des Faserlaser-Drucksensors besteht darin, daß die Temperaturempfindlichkeit durch den differentiellen Aufbau der Sensorfaser weitgehend zurückgedrängt ist, zusätzlich aus der Bragg-Wellenlänge die Temperatur bestimmbar ist und dadurch die Zuverlässigkeit (quasi)statischer Druckmessungen deutlich verbessert ist.

Sehr vorteilhaft ist schließlich auch der kompakte und robuste Aufbau, durch den der Faserlaser-Drucksensor hervorragend für den Einsatz unter hohen Drücken und Temperaturen und insbesondere zur Druckmessung in Erdölbohrlochern geeignet ist.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1a)** einen optischen Aufbau eines Faserlaser-Drucksensors mit temperaturkompensierter polarimetrischer Sensorfaser und aktiver Polarisationskontrolle; **b)** Beispiele für nicht rotationssymmetrische Sensorfasern;

**Fig. 2a), b)** Frequenzverschiebung von Longitudinalmoden durch druck- oder temperaturinduzierte Doppelbrechung in der Sensorfaser;

**c)** Longitudinalmoden eines Faserlasers und Reflexionspektren von Faser-Bragg-Gitter Endreflektoren;

**Fig. 3** eine Detektionseinheit für einen Faserlaser-Drucksensor gemäß **Fig. 1** ohne Polarisationskontrolle;

**Fig. 4** einen optischen Aufbau eines Faserlaser-Drucksensors mit temperaturkompensierter Zweimoden-Sensorfaser und Faserpolarisator;

**Fig. 5** eine Multiplex-Anordnung von Faserlaser-Drucksensoren mit unterschiedlichen Emissionswellenlängen ( $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ );

**Fig. 6-8** verschiedene Druckgehäuse für einen Faserlaser mit langgestreckter Sensorfaser.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

**Fig. 1a** zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Faserlaser-Drucksensors **1**, der insbesondere zur Druckmessung in Erdölbohrlochern geeignet ist. Der Sensor **1** umfaßt eine Pumplichtquelle **8**, Zuführungsfasern **7a-7d**, einen Faserlaser **2**, der eine laserverstärkende Faser **3** und mindestens zwei Endreflektoren **4a, 4b** aufweist, eine Detektionseinheit **12** und eine Auswertelektronik **17**. Zwischen den Endreflektoren **4a, 4b** ist eine Sensorfaser **5, 5a, 5b** mit einer bezüglich der Faserlängsachse nicht rotationssymmetrischen Struktur angeordnet. Bevorzugt weist die Sensorfaser **5, 5a, 5b** einen elliptischen Kern auf und ist unmittelbar als ganzes oder teilweise einem zu messenden Druck, insbesondere einem ra-

dial wirkenden hydrostatischen Druck, ausgesetzt. Generell kann die Sensorfaser **5** einstückig oder für eine inhärente Temperaturkompensation zweistückig **5a, 5b** ausgeführt sein. Die Endreflektoren **4a, 4b** sind auf einfache Weise als Faser-Bragg-Gitter **4a, 4b** realisierbar. In der dargestellten Reflexionskonfiguration steht die Pumplichtquelle **8**, der Faserlaser **2** und die Detektionseinheit **12** durch einen vorzugsweise wellenlängenselektiven Faserkoppler **9** in optischer Verbindung. Die Detektionseinheit **12** umfaßt einen Analysator **14**, einen Detektor **15** und insbesondere eine aktive Polarisationskontrolle **13**. Der Detektor **15** ist über eine Signalleitung **16** mit der Auswertelektronik **17** verbunden, die ihrerseits einen Frequenzfilter **18** und einen Frequenzzähler **19** aufweist. Typischerweise sind die Fasern **3, 4a, 4b, 5a, 5b** durch Splice **10a-10f** miteinander und mit den Zuführungsfasern **7b, 7d** verbunden und bilden einen mechanisch stabilen Aufbau. Ein optischer Isolator **11** zwischen dem Faserkoppler **9** und der Detektionseinheit **12** ist nützlich zur Unterdrückung von Rückreflexen in den Faserlaser **2**.

Die Sensorfaser **5, 5a, 5b** soll mehrere, vorzugsweise zwei, Polarisations- oder Raummoden tragen, zwischen denen durch druckabhängige Doppelbrechung eine differentielle Phasenverschiebung induziert werden kann. Mit Vorteil handelt es sich daher bei der Sensorfaser **5, 5a, 5b** um eine als Polarimeter wirkende Monomodefaser (**Fig. 1**) oder besonders bevorzugt um eine Zweimodefaser (**Fig. 4**). Als rotationsasymmetrische Sensorfasern **5, 5a, 5b** sind doppelbrechende Fasern, insbesondere stark doppelbrechende oder polarisationserhaltende Fasern, gut geeignet. Polarisationserhaltende Fasern mit elliptischem Kern sind als Zweimodefasern einsetzbar. Neben Fasern mit elliptischem Kern (forminduzierte Doppelbrechung) sind auch solche mit "bow-tie"-Struktur, "panda"-Struktur oder einer elliptischen inneren oder äußeren Faserhülle (stressinduzierte Doppelbrechung) gebräuchlich. Diese Typen sind in dem Artikel von K.-H. Tsai et al., "General Solutions for Stress-Induced Polarization in Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology Vol. 9, Nr. 1, 1991 dargestellt. Fasern mit forminduzierter Doppelbrechung verursachen bei weitem die geringsten temperaturbedingten Phasenverschiebungen. **Fig. 1b** zeigt als weitere Beispiele für doppelbrechende Sensorfasern **5, 5a, 5b** eine Faser (A) mit elliptischem oder rundem Kern **51** und angeschliffener Hülle **52** ("D-shape" Struktur) und eine Faser (C) mit rundem Kern **51**, runder Hülle **52** und Seitenlöchern **53** ("side-hole" Struktur). Eine Besonderheit stellt die doppelbrechungsfreie Faser (B) mit rundem Kern **51** und teilweise angeschliffener, rotationsasymmetrischer Faserhülle **52** dar. Die Faserhülle **52** kann einseitig, zweiseitig oder mehrseitig angeschliffen sein, so daß durch isotropen Druck die Entartung der Polarisationsmoden aufgehoben und die gewünschte Doppelbrechung induziert wird.

Ein erhebliches Problem für die Meßgenauigkeit eines Faserlaser-Drucksensors **1** besteht darin, daß die Doppelbrechung von Sensorfasern **5, 5a, 5b** oftmals temperaturabhängig ist. Eine vorteilhafte Ausnahme stellt die Faser (B) dar. Im Fall eines polarimetrischen Drucksensors **1** ist eine weitgehende Temperaturempfindlichkeit durch den erfindungsgemäßen differentiellen Aufbau der Sensorfaser **5a, 5b** gemäß **Fig. 1a** realisierbar. Die Sensorfaser **5a, 5b** besteht aus genau zwei Fasersegmenten **5a, 5b**, die hinsichtlich ihrer Faserparameter, insbesondere der Größe und Temperaturabhängigkeit der Doppelbrechung, und ihrer Länge zumindest weitgehend identisch sind, die um 90° zueinander verdreht sind und vorzugsweise über einen Spleiß **6** miteinander in optischer Verbindung stehen. Der 90°-Rotationswinkel sollte mit einer Genauigkeit von  $\pm 30^\circ$ , insbesondere  $\pm 10^\circ$  eingehalten sein. Man erhält aber schon bei von 0° abweichenden Rotationswinkeln temperaturunabhängige Schwe-

bungssignale. Wenn die Störgröße (Temperatur) auf beide Segmente 5a, 5b und die Meßgröße (Druck) nur auf ein Segment 5a oder 5b wirken, werden die Störeffekte genau kompensiert und die Meßgröße extrahiert. Natürlich können auch mehrere Mess- und/oder Referenz-Fasersegmente 5a, 5b vorhanden sein. Ein wesentlicher Vorteil dieser Anordnung ist die gute absolute Eichbarkeit des Drucksignals, da dem Druck 0 bei beliebigen Temperaturen idealerweise die Schwebungsfrequenz 0 entspricht. Auch kann ein statischer Referenzdruck, der auf das vom Medium 30 abgeschirmte Referenzfasersegment 5a; 5b einwirkt, so vorgegeben werden, daß die Schwebungsfrequenz um einen gewünschten additiven Wert reduziert wird. Wenn die Fasersegmente 5a; 5b unterschiedliche Faserparameter (Kerngröße, Elliptizität, Indexsprung, usw.) haben, sollen ihre Längen so gewählt sein, daß die durch temperaturabhängige Doppelbrechung hervorgerufenen Phasenverschiebungen weitgehend gleich sind. Die Entartung der Eigenfrequenzen bei verschwindendem Druck ist dann i. a. aufgehoben.

Im Falle einer Zweimoden-Sensorfaser (Fig. 4) sollen die Segmente 5a, 5b parallel unter 0° oder orthogonal unter 90° zueinander orientiert. Die Winkelbereiche sollen wieder vorzugsweise  $\pm 30^\circ$ , insbesondere  $\pm 10^\circ$  betragen. Die parallele Orientierung hat den Vorzug, daß eine Kompensation temperaturinduzierter Phasenverschiebungen genau bei identischen Längen von Segmenten 5a, 5b des gleichen Fasertyps erzielbar ist. Temperaturunabhängige Schwebungssignale treten aber schon bei von 90° abweichenden Rotationswinkeln auf. Die Spleisse 10c, 6 und 10d sind transversal verschoben, so daß im ersten Segment 5a beide Raummoden LP<sub>01</sub> und LP<sub>11</sub><sup>gerade</sup> angeregt werden, beide Raummoden beim Übertritt in das Segment 5b über Kreuz gekoppelt werden und die Interferenz beider Raummoden in die Zuführungsfaser 7d oder 7b eingekoppelt wird. Bei Druck auf ein Fasersegment 5a; 5b wird die Doppelbrechung zwischen den Raummoden modifiziert, eine Phasenverschiebung induziert und im Faserlaser eine Frequenzverstimmung und Schwebungsfrequenzen zwischen den Raummoden erzeugt. Aufgrund der differentiellen Anordnung der Fasersegmente 5a, 5b ist wiederum eine temperaturkompensierte Druckmessung realisierbar. Alternativ dazu ist auch eine rein passive Temperaturkompensation mit einer einstückigen Sensorfaser 5 möglich. Bei Zweimodenfasern existiert nämlich eine charakteristische Wellenlänge  $\lambda_c$ , bei welcher die Gruppengeschwindigkeiten beider Raummoden LP<sub>01</sub> und LP<sub>11</sub><sup>gerade</sup> gleich sind und keine temperaturinduzierten Phasenverschiebungen zwischen den Moden auftreten. Somit ist ein weitgehend temperaturkompensierter Faserlaser-Drucksensor 1 dadurch realisierbar, daß die Emissionswellenlänge, d. h. die Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B$  der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b, im Spektralbereich einer verschwindenden Doppelbrechung der Gruppenbrechungsindizes der Sensorfaser 5, 5a, 5b gewählt ist.

Ergänzend oder alternativ zu passiven Temperaturkompensationsanordnungen ist sowohl bei polarimetrischen als auch bei Zweimoden-Sensorfasern 5, 5a, 5b eine aktive Temperaturmessung und Drucksignalkorrektur durchführbar, indem beispielsweise die Bragg-Wellenlänge ( $\lambda_B$ ) als Maß für die Temperatur Verwendung findet. Beispielsweise kann zwischen dem Isolator 11 und der Polarisationskontrolle 13 ein zusätzlicher Faserkoppler mit einem optischen Wellenlängenmeter (nicht dargestellt) vorgesehen sein und mit Hilfe einer geeichten Wellenlängenmessung die absolute Temperatur des Faserlasers 2 bestimmt werden.

Anhand von Fig. 2 soll die Funktionsweise des Faserlasers 2 und einer zweistückigen Sensorfaser 5, 5a, 5b näher erläutert werden. Der Faserlaser 2 stellt eine Laserkavität mit Longitudinalmoden 33 dar (Fig. 2a, 2b). Deren Eigen-

frequenzen sind dadurch charakterisiert, daß die optische Länge des Faserlasers 2 durch ganzzahlige Vielfache der halben Laserwellenlänge ausgefüllt ist. Der Frequenzabstand  $\Delta\nu_0$  zwischen benachbarten Longitudinalmoden 33 ist unter Vernachlässigung von Dispersionseffekten aequidistant und beträgt für einen in das erste Sensorfasersegment 5a eingekoppelten Polarisationsmode x, y oder Raummode LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub><sup>gerade</sup>

$$\Delta\nu_0 = c / [2 \cdot (n_d \cdot L_d + n_a \cdot L_a + n_b \cdot L_b)] \quad (G1),$$

wobei c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum;  $n_d$  = effektive Brechungsindex der dotierten Faser 3;  $L_d$  = Länge der dotierten Faser;  $n_a$ ,  $n_b$  = effektive Brechungsindizes des eingekoppelten Moden in den beiden Sensorfasersegmenten 5a, 5b und  $L_a$ ,  $L_b$  = Längen der Sensorfasersegmente 5a, 5b. Für den orthogonal eingekoppelten Mode oder den zweiten Raummode ergibt sich ein Frequenzabstand  $\Delta\nu_0'$  wie in (G1) mit den zugehörigen Brechungsindizes  $n_a$ ,  $n_b'$ . Zur Vereinfachung der Rechnung, jedoch ohne Einschränkung der Allgemeinheit, wird angenommen, daß beide Sensorfasersegmente 4a, 4b von gleichem Typ und gleicher Länge sind, so daß gilt:  $n_a' = n_b$ ,  $n_b' = n_a$ ,  $L_a = L_b$  und

$$\Delta\nu_0 = \Delta\nu_0' = c / [2 \cdot (n_d \cdot L_d + (n_a + n_b) L)] \quad (G2)$$

Ohne Druck auf die Sensorfaser 5a, 5b sind dann die Doppelbrechungen  $\Delta n_a = n_a - n_a'$  und  $\Delta n_b = n_b - n_b'$  in den Segmenten 5a und 5b entgegengesetzt gleich und die Frequenzen beider Moden sind entartet. Wird ein Druck beispielsweise auf das Segment 5a ausgeübt, ändert sich die Doppelbrechung  $\Delta n_a$  und die Phasenverschiebung  $\Phi = (2 \cdot \pi / \lambda) \cdot L \cdot \Delta n_a$  proportional zum Druck:

$$\Delta\Phi = K_p \cdot p \cdot L \quad \text{mit} \quad (G4)$$

$$K_p = 2 \cdot \pi / \lambda \cdot \left[ \partial (\Delta n_a) / \partial p + (\Delta n_a / L) \cdot \partial L / \partial p \right] \quad (G5)$$

wobei  $\Delta\Phi$  = induzierte Phasenverschiebung,  $K_p$  = Proportionalitätskonstante, p = Druck und  $\lambda$  = Wellenlänge des Faserlasers 2. Dieser Ausdruck ist in erster

Ordnung gültig und berücksichtigt nicht Abhängigkeiten höherer Ordnung von Druck und/oder Temperatur. Durch die Phasenverschiebung  $\Delta\Phi$  werden die Eigenfrequenzen orthogonaler Moden des Faserlasers relativ zueinander verschoben. Wie aus den Fig. 2a und 2b ersichtlich ergeben sich dadurch die Schwebungsfrequenzen  $\Delta\nu_1$  und  $\Delta\nu_0 - \Delta\nu_1$  und allgemein  $m \cdot \Delta\nu_0 \pm \Delta\nu_1$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Die Frequenzabstände bleiben praktisch unverändert und sind wie zuvor näherungsweise aequidistant und gleich. Der maximal meßbare Druck ist durch die Bedingung gegeben, daß die Schwebungsfrequenz, beispielsweise die grundlegende  $\Delta\nu_1$ , eindeutig detektierbar sein soll, d. h. daß  $\Delta\nu_1 < \Delta\nu_0/2$  gilt. Dies entspricht einer maximal zulässigen druckinduzierten Phasenverschiebung  $\Delta\Phi_{\max} = \pi/2$ .

Zur Verdeutlichung einige quantitative Abschätzungen zum Druckmeßbereich und Druckauflösungsvermögen: Kommerziell erhältliche polarisationserhaltende Fasern 5a, 5b mit elliptischem Kern zeigen eine typische hydrostatische bzw.

isotrope Druckempfindlichkeit  $K_p \approx 0,7 \text{ rad}/(\text{Mpa} \cdot \text{m})$  bei  $\lambda \approx 800 \text{ nm}$ . Wegen  $K_p \approx 1/\lambda$  ist  $K_p \approx 0,35 \text{ rad}/(\text{Mpa} \cdot \text{m})$  bei  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$ . Somit existiert bei dieser Wellenlänge eine obere Schranke für das Produkt aus Sensorfaserslänge L und Druck p

$$L \cdot p < \Delta\Phi_{\max} / K_p = 4,5 \text{ MPa} \cdot \text{m} \quad (G6).$$

Beispielsweise können mit einem Sensorfasersegment 5a der Länge  $L_s = 4,5$  cm Maximaldrücke bis zu 100 MPa (= 1000 bar) gemessen werden:

Das Druckauflösungsvermögen ist durch das Verhältnis von Linienbreite zur maximalen Schwebungsfrequenz  $\Delta\nu_0/2$  gegeben. Typische Werte für diese Größen liegen im 1–10 kHz-Bereich und im 100 MHz–1 GHz-Bereich. Beispielsweise sei eine dotierte Faser 3 von 25 cm, Sensorfasersegmente 5a, 5b von je 5 cm und ein mittlerer effektiver Brechungsindex von 1,45 angenommen. Dann beträgt gemäß Gleichung (G2) der Frequenzabstand  $\Delta\nu_0 = 295$  MHz und die Wellenlängenseparation zwischen benachbarten Longitudinalmoden  $\Delta\lambda = \lambda^2/c \cdot \Delta\nu_0 = 0,0024$  nm.

Weitere Designkriterien für die Auslegung des erfindungsgemäßen Faserlaser 2 und insbesondere der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b werden im Zusammenhang mit Fig. 2c erläutert. Das Emissionsspektrum des Faserlasers 2 besteht aus den Longitudinalmoden 33, welche innerhalb des Fluoreszenzspektrums der dotierten laserverstärkenden Faser 3 und der Reflexionsspektren 34 der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b liegen und dort mehr Verstärkung als Verluste erfahren. Mit Vorteil ist der Faserlaser 2 so optimiert, daß die Laserschwelle niedrig ist, wenige Longitudinalmoden 33 anschwängen und eine geringe Temperaturempfindlichkeit des Laserverhaltens resultieren. Daraus ergibt sich für die Dimensionierung der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b das Optimierungsproblem, eine hohe Reflektivität  $R$  und eine geringe spektrale Breite oder Bandbreite  $\Delta\nu_B$  zu erzielen und störende Temperatureffekte zu eliminieren.

Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b sind mit hohen Reflektivitäten bis zu annähernd 100% und kleinsten Bandbreiten bis ca.  $\Delta\nu_B = 0,2$  nm bei einer Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B \approx 1550$  nm erhältlich. Die spektrale Position des Reflexionsmaximums, charakterisiert durch die Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B$  bzw. die Bragg-Frequenz  $\nu_B$ , verschiebt sich mit der Temperatur um typischerweise  $0,01$  nm/°C bei  $\lambda_B \approx 1550$  nm. Für eine tiefe Laserschwelle ist es von Vorteil, wenn die Reflektivität des ersten Faser-Bragg-Gitters 4a im Bereich 85%–99%, insbesondere gleich 90%, und die des zweiten Faser-Bragg-Gitters 4b größer als 98%, insbesondere größer als 99%, gewählt ist. Eine geringe Anzahl aktiver Longitudinalmoden 33 ist einerseits durch eine kurze Faserlaserlänge  $L_d + 2 \cdot L_s$  und andererseits durch die Wahl kleiner spektraler Breiten  $\Delta\nu_B^{(1)}$ ,  $\Delta\nu_B^{(2)}$  der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b realisierbar. Bevorzugt sind die Bandbreiten  $\Delta\nu_B^{(1)}$ ,  $\Delta\nu_B^{(2)} < 0,7$  nm, insbesondere  $\Delta\nu_B^{(1)}$ ,  $\Delta\nu_B^{(2)} < 0,3$  nm gewählt. Durch die Einschränkung auf einige wenige Longitudinalmoden 33 wird einer Linienverbreiterung der Schwebungsfrequenzen durch Dispersion im Faserlaser 2 entgegengewirkt.

Durch unterschiedliche Verschiebungen der Reflexionswellenlängen, z. B. aufgrund unterschiedlicher Temperaturen der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b, können die Verluste im Faserlaser 2 ungebührlich erhöht werden. Eine erfindungsgemäße Vorsichtsmaßnahme besteht darin, beide Gitter mit gleicher Reflexionswellenlänge und eines der Gitter mit größerer Bandbreite ( $\Delta\nu_B^{(1)} > \Delta\nu_B^{(2)}$ ) zu wählen, um immer eine vollständige Überlappung der Reflexionsspektren zu gewährleisten. Insbesondere ist die eine Bandbreite  $\Delta\nu_B^{(1)}$  zweimal und bevorzugt dreimal so groß wie die andere  $\Delta\nu_B^{(2)}$ . Eine günstige Wahl ist z. B.  $\Delta\nu_B^{(1)} = 0,6$  nm und  $\Delta\nu_B^{(2)} = 0,2$  nm.

Bei der laserverstärkenden Faser 3 handelt es sich mit Vorteil um eine mit einigen 100 ppm Erbium ( $\text{Er}^{3+}$ )-Ionen dotierte Faser 3, die Absorptionsbänder u. a. bei 1480 nm und 980 nm und optische Verstärkung oberhalb 1000 nm und im Spektralbereich 1530 nm–1570 nm aufweist. Kommerzielle Pumpaserdioden 8 sind sowohl für 1480 nm als auch für 980 nm erhältlich. Eine 1480 nm Pumpaserdiode

ist bei großen Entfernungen von einigen km zwischen Pumpaser 8 und Faserlaser 2 und/oder bei vielen Faserlasern 2 in Multiplexanordnung vorzuziehen, da das Pumplicht geringere Verluste in den Zuführungsfasern 7a–7d erleiden. Auch sind optische Komponenten für 1550 nm gut erhältlich. Die Absorption von Pumplicht beträgt für eine  $\text{Er}^{3+}$ -Dotierungskonzentration von 220 ppm typischerweise 3,3 dB/m bei 1480 nm. Die Laserschwelle liegt je nach optischen Verlusten in der Größenordnung einiger mW absorbierter Pumpleistung. Die Pumplichtquelle weist vorzugsweise eine optische Leistung über 100 mW auf. Auch andere Dotierungen und Spektralbereiche können genutzt werden. Beispielsweise seien als seltene Erden-Elemente Praseodym ( $\text{Pr}^{3+}$ ) mit Emission bei 1300 nm, Neodym ( $\text{Nd}^{3+}$ ) bei 1060 nm oder Thulium ( $\text{Tm}^{3+}$ ) bei 810 nm genannt. Die Pumpwellenlänge und die Reflexionswellenlänge der Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b sind entsprechend anzupassen.

Die Fig. 1a und 3 zeigen Anordnungen zur Erzeugung und Detektion der Schwebungsfrequenz(en) für polarimetrische Sensorfasern 5, 5a, 5b. Das vom Faserlaser 2 emittierte Licht wird (überwiegend) auf der Seite des weniger reflektierenden Faser-Bragg-Gitters, d. h. 4a in einer Reflexionskonfiguration oder 4b in einer nicht dargestellten Transmissionskonfiguration, ausgekoppelt. Im folgenden sei eine polarimetrische Reflexionsanordnung unterstellt. Im Faserkoppler 9 wird das Emissionslicht vom Pumplicht aufgrund der verschobenen Wellenlänge separiert. Rückreflexe in den Faserlaser 2 werden durch den vorzugsweise faseroptischen Isolator 11 und durch einen Schräganschluß des Endes der Faser 7d unterdrückt. In der Detektionseinheit werden die Polarisationsmoden  $x$ ,  $y$  im Analysator 14 zur Interferenz gebracht. Der Orientierungswinkel des Analysators 14 relativ zu den Achsen der Polarisationsmoden  $x$ ,  $y$  ist liegt zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  und insbesondere bei  $45^\circ$ . Der Analysator 14 kann massivoptisch oder einfacher als Faserpolarisator 14 ausgeführt sein. Im Detektor 15 wird das Interferenzsignal in ein intensitätsproportionales elektrisches Signal umgewandelt. Der Detektor 15, typischerweise eine Photodiode 15, benötigt hierfür eine Bandbreite, die größer als die zu messende Schwebungsfrequenz ist. Im Frequenzfilter 18 wird das gewünschte Schwebungssignal separiert und einem Frequenzzähler 19 zugeführt. Alternative Ausführungsformen der Auswertelektronik 17 können einen Radiofrequenz-Spektralanalysator, ein Oszilloskop oder andere Hochfrequenz- oder Mikrowellen-Meßinstrumente umfassen.

In längeren oder gestörten Zuführungsfasern 7b–7d kann die Polarisation der beiden Moden  $x$ ,  $y$  leicht verlorengehen. Zur Wiederherstellung der Polarisation ist eine Polarisationskontrolle 13 vorgesehen, in welcher eine die Störungen kompensierende Doppelbrechung (Größe und gegebenenfalls Achsenorientierung) erzeugt wird. Alternative zur Polarisationskontrolle 13 können polarisationserhaltende Komponenten 7b–7d, 9, 11 mit gleicher Orientierung wie der Analysator 14 verwendet werden. Als weitere Alternative kann das Schwebungssignal unmittelbar außerhalb des Faserlasers 2 durch einen Faserpolarisator 14 (nicht dargestellt) erzeugt werden, der unter einem Winkel  $\neq 0^\circ$  oder  $90^\circ$ , insbesondere unter  $45^\circ$ , zu den Doppelbrechungsachsen der Sensorfaser 5, 5a, 5b orientiert ist.

Fig. 3 zeigt eine andere Alternative, bei welcher die Detektionseinheit 12 einen polarisationserhaltenden Faserkoppler 22 mit zwei unter  $0^\circ (\pm 10^\circ)$  und  $45^\circ (\pm 10^\circ)$  orientierten Analysatoren 14a, 14b und zwei Detektoren 15a, 15b aufweist. Die Analysatoren sind vorzugsweise Faserpolarisatoren 14a, 14b, die über Spleisse 21a, 21b mit dem Faserkoppler 22 verbunden sind. Die Auswertelektronik 17 umfaßt zusätzlich einen Summierer 20, mit dessen Eingängen

die Detektoren 15a, 15b über Signalleitungen 16a, 16b verbunden sind. Eine weitere Alternative zur Erzeugung von Interferenz zwischen den Polarisationsmoden x, y besteht darin, eine starke Kopplung zwischen den Moden x, y zu erzeugen, beispielsweise durch Mikroverbiegungen ("micro-bending") der Faser hinter dem optischen Isolator 11.

Fig. 4 stellt eine stark vereinfachte Variante zu Fig. 1 dar, bei welcher anstelle einer einmodigen eine zweimodige Sensorfaser 5a, 5b mit elliptischem Kern Verwendung findet. Die Interferenzbildung zwischen den räumlichen Moden  $LP_{01}$  und  $LP_{11}^{gerade}$  erfolgt unmittelbar am transversal versetzten Spleiß 10c. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer Polarisationskontrolle 13 und eines Analysators 14 vor dem Detektor 15. Mit Vorteil ist in oder neben dem Faserlaser 2 ein Faserpolarisator 14 z. B. mit Spleißen 10d und 10e eingefügt. Dann können die räumlichen Moden  $LP_{01}$  und  $LP_{11}^{gerade}$  nur mit einer linearen Polarisation x oder y anschwängen und die Anzahl Schwebungsfrequenzen ist halbiert. Dieser Sensoraufbau zeichnet sich durch eine deutlich reduzierte Komplexität und sehr gute Eignung für Multiplexanordnungen gemäß Fig. 5 aus.

Fig. 5 zeigt eine Multiplexanordnung, die mehrere Faserlaser 2 unterschiedlicher Emissionswellenlängen  $\lambda_1, \dots, \lambda_i$  umfaßt. Die Faserlaser 2 stehen mit genau einer Pumplichtquelle 8 und genau einer Detektionseinheit 12 in optischer Verbindung. Die Detektionseinheit 12 weist einen Wellenlängendemultiplexer 23 und einen Mehrkanal-Detektor 24 auf, der mit einer Mehrkanal-Auswerteelektronik 17 in elektrischer Verbindung steht. In jedem Kanal wird eine Schwebungsfrequenz wie zuvor beschrieben detektiert. Insbesondere umfaßt die Auswerteelektronik 17 für jeden Faserlaser 2 einen Frequenzfilter 18 und einen Frequenzzähler 19. Für die dargestellte serielle Multiplexanordnung sind die Dotierungskonzentrationen und Längen der laserverstärkenden Fasern 3 so gewählt, daß in jedem Faserlaser 2 genügend Pumpleistung absorbiert und genügend Pumpleistung für die nachfolgenden Faserlaser 2 transmittiert wird. Es ist daher sehr vorteilhaft, daß separate Verstärkungsfasern 3 und Sensorfasern 5a, 5b vorgesehen sind und das Laserverhalten und die Druckempfindlichkeit des Sensors 1 unabhängig voneinander optimierbar sind. Der Abstand zwischen den Emissionswellenlängen ist so groß gewählt, daß die Reflexionsspektren aller Faserlaser 2 auch bei Temperaturdifferenzen überlappungsfrei bleiben und eine spektrale Trennung der Signale im Demultiplexer 23 möglich ist. Somit benötigt jeder Faserlaser 2 für einen Temperaturbereich zwischen 0°C und 230°C ein Wellenlängenfenster von mindestens 2,4 nm. Die Multiplexanordnung kann auch parallel oder netzwerkartig aufgebaut sein. Beispielsweise kann das Pumplicht auch neben den Faserlasern 2 geführt sein und diesen einzeln über Faserkoppler zugeführt werden. Die Ausbreitungsrichtungen von Pumplicht und Laseremission dürften gleiche Richtung haben. Vorteilhaft an einer Wellenlängen-Multiplexanordnung ist es, daß der grundlegende Aufbau, insbesondere die Reflexionskonfiguration mit einem die Pumpwellenlänge selektierenden Faserkoppler 9, beibehalten werden kann und die Kanaltrennung auf einfache Weise mit dem optischen Wellenlängendemultiplexer 23 durchführbar ist.

Die Fig. 6-9 zeigen Ausführungsbeispiele zu Druckgehäusen 25 mit temperaturkompensierten Sensorfasersegmenten 5a, 5b. Die Idee besteht darin, die Endreflektoren 4a, 4b, die laserverstärkende Faser 3 und das Referenzfasersegment 5a oder 5b abzuschirmen und nur das Meßfasersegment 5b oder 5a dem zu messenden Druck p des Mediums 30 auszusetzen. Ferner ist ein kleiner, schlanker, mechanisch und thermisch stabiler Sensoraufbau 2 erwünscht.

Die erfindungsgemäße Lösung besteht darin, daß der Fa-

serlaser 2 in einem druckfesten Gehäuse 25 mit mehreren Druckkammern 27a-27c und druckdichten Faserdurchführungen 28a-28d montiert ist und eine erste Druckkammer 27c, die ein Meßfasersegment 5a; 5b der Sensorfaser 5 enthält, in direktem Druckaustausch mit dem umgebenden Medium 30 steht. Die Durchführungen 28a-28d schaffen eine faseroptische Verbindung zwischen den Druckkammern 27a-27c und nach außen. Das Gehäuse 25 hat vorzugsweise drei Druckkammern 27a-27c, eine längliche, insbesondere zylindrische, Gestalt, eine im wesentlichen dem Faserlaser 2 entsprechende Länge und einen Durchmesser von maximal 10 mm. Bevorzugt weist das Gehäuse 25, insbesondere die Druckkammer 27c, für den Druckaustausch eine Öffnung 26 auf, die mit einer Druckmembran 32 versehen ist, und enthält ein Fluid 31, beispielsweise Silikonöl. Auf diese Weise wird der Umgebungsdruck p allseitig auf das Meßfasersegment 5a; 5b übertragen und diese vor direktem Kontakt mit dem Medium 30 geschützt.

Im Detail zeigen die Fig. 6-9, daß in einer zweiten Druckkammer 27a ein Faser-Bragg-Gitter 4a und die laserverstärkende Faser 3 und in einer dritten Druckkammer 27b ein Faser-Bragg-Gitter 4b und ein Fasersegment 5b der Sensorfaser montiert sind. Die zweite und dritte Druckkammer 27a, 27b stehen vorzugsweise unter Vakuum, Niederdruckgas oder Normaldruck. Sie können als Innenkapillare 27a, 27b (Fig. 6) oder als Gehäuseabteile (Fig. 7) realisiert sein. Günstigerweise sind die Innenkapillare 27a, 27b, zylindrisch und bestehen aus korrosionsbeständigem Stahl oder Quarzglas, welches einen optimal an die Fasern 3, 4a, 4b, 5a, 5b angepaßten thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt. Die Fasern 3, 4a, 4b, 5a, 5b sind spannungsfrei in den Druckkammern 27a-27c befestigt, um Faserdehnungen aufgrund thermischer oder mechanischer Belastungen des Gehäuses 25 zu vermeiden. Bei einem einzelnen Faserlaser 2 oder dem letzten in einer Multiplexanordnung entfallen Zuleitungsfaser 7d und Faserdurchführung 28d und die Faser mit dem Faser-Bragg-Gitter 4b kann innerhalb des Gehäuses 25 enden (Fig. 7). Anstelle des ersten Fasersegments 5a kann auch das zweite 5b dem Umgebungsdruck p unterworfen sein (Fig. 8).

Ferner kann eine einmodige Zwischenfaser 35 im Bereich der druckdichten Faserdurchführung 28c zwischen den Fasersegmenten 5a, 5b angeordnet sein (Fig. 9). Die Zwischenfaser 35 dient dazu, die Kraft der Faserdurchführung 28c aufzunehmen und eine weitgehend kräftefreie Halterung der Sensorfasern 5a, 5b zu ermöglichen. Vorzugsweise hat die Zwischenfaser 35 einen elliptischen Kern, durch den eine fixe, weitgehend kraftunabhängige Achsenorientierung der Doppelbrechung gewährleistet ist. Die orthogonalen Moden x, y oder  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}^{gerade}$  der Sensorfasern 5a, 5b sollen durch die gleichen Moden oder vorzugsweise den gleichen Mode in der Zwischenfaser 35 übertragen werden, um druckbedingte Phasenverschiebungen in der Zwischenfaser 35 inhärent zu kompensieren. Die Kernellipse der Zwischenfaser 35 soll deshalb im Falle polarimetrischer Monomode-Sensorfasern 5a, 5b unter 45° ( $\pm 10^\circ$ ) und im Falle räumlicher Zweimoden-Sensorfasern 5a, 5b parallel oder orthogonal ( $\pm 10^\circ$ ) zu den Achsen der Segmente 5a, 5b stehen. Im letzteren Fall sind die zusätzlichen Spleisse 6 transversal versetzt, um beide Raummoden der Segmente 5a, 5b möglichst gleichmäßig ein- und auszukoppeln. Die orthogonalen Moden werden nur teilweise über Kreuz gekoppelt und es treten zusätzliche, temperaturabhängige Schwebungsfrequenzen auf. Die Wirksamkeit der passiven Temperaturkompensation ist somit gewahrt.

Das erfindungsgemäße Druckgehäuse 25 für den Faserlaser-Drucksensor 1 weist mehrere Vorteile auf. Das Gehäuse 25 zeichnet sich durch Kompaktheit, geringes Gewicht und



große mechanische und thermische Belastbarkeit aus. Es ist mit seiner dünnen, länglichen Gestalt einer optischen Faser optimal angepaßt und sehr gut für den Einsatz in großen Faserstrecken 7a-7d mit vielen Druckmeßstellen insbesondere in Ölförderbohrlöchern geeignet. Im Gehäuse 25 können problemlos Fasern 3, 4a, 4b, 5a, 5b montiert sein, die eine hochtemperaturtaugliche Fasermantelung, z. B. aus Polyimide oder Metall, und/oder ein Faserkabel 29 aufweisen. Auch sind spezielle Fasermantelungen zur Anpassung der akustischen Impedanz zwischen Sensorfaser 5, 5a, 5b und Medium 30 oder Fluid 31 beispielsweise für (Ultra)Schalldetektoren auf einfache Weise realisierbar.

Die Reihenfolge der Fasern 3, 5a, 5b im Faserlaser 2 ist i. a. beliebig. Insbesondere kann die dotierte Faser auch am hinteren Ende des Faserlaser 2 oder zwischen den beiden Sensorfasersegmenten 5a, 5b angeordnet sein. Die Sensorfaser 5a, 5b kann auch aus einer polarimetrischen Monomodefaser 5a und einer Zweimodefaser 5b bestehen. Dann ist z. B. eine polarimetrische Druckmessung und eine Zweimodefaser-Temperaturmessung oder umgekehrt möglich. Im Falle einer einstückigen Sensorfaser 5 entfällt jeweils das vor dem Umgebungsdruck p geschützte Fasersegment 5a oder 5b und die Druckgehäuse 25 aus den Fig. 6-8 vereinfachen sich entsprechend. Generell können die Faser-Bragg-Gitter 4a, 4b direkt in die dotierte laserverstärkende Faser 3 und/oder in die Sensorfaser 5, 5b geschrieben sein. Für besonders kompakte Faserlaser-Drucksensoren 2 können auch die laserverstärkende Faser 3 und die Sensorfaser 5, 5a, 5b identisch sein, d. h. die Sensorfaser 5, 5a, 5b ist mit seltenen Erden-Ionen dotiert und wirkt zugleich als laserverstärkende Faser 3. Dann sind sowohl der maximal meßbare Druck als auch näherungsweise die Laserschwelle umgekehrt proportional zur Länge der Sensor-Laser-Faser 5, 5a, 5b, 3.

Der erfindungsgemäße Faser-Laser-Sensor 1 kann außer zur Messung isotroper Drücke auch für andere Meßgrößen ausgelegt sein. Beispielsweise sind auch anisotrope transversale oder longitudinale Kräfte oder Dehnungen und Temperaturen meßbar. Zur Messung longitudinaler Dehnungen und von Temperaturen ist die Sensorfaser 5, 5a, 5b doppelbrechend und bevorzugt zweimodig gewählt. Dabei sind die oben beschriebenen Sensoraufbauten 2 so zu betreffen, daß die Meßgröße auf die einstückige Sensorfaser 5 oder auf ein Segment 5a, 5b einwirkt.

Insgesamt offenbart die Erfindung einen frequenzkodierten Faserlaser-Drucksensor 1 zur Messung vorzugsweise isotroper Drücke, dessen druckempfindliches Sensorelement aus einer vorzugsweise länggestreckten, rotationsasymmetrischen Sensorfaser 5, 5a, 5b besteht und der rein optisch ausgelesen wird, einfach multiplexierbar ist und in einem sehr kompakten, leichtgewichtigen und robusten Druckgehäuse 25 verpackt werden kann.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Faserlaser-Drucksensor
- 2 Faserlaser
- 3 laserverstärkende Faser, dotierte Faser
- 4a, 4b Endreflektoren, Faser-Bragg-Gitter
- 5, 5a, 5b doppelbrechende Sensorfaser, Sensorfasersegmente; Fasern mit elliptischem Kern (einmodig oder zweimodig)
- 51 Faserkern
- 52 Faserhülle ("cladding")
- 53 seitliche Löcher
- 6 90°-Spleiß
- 7a-7d Zuführungsfasern
- 8 Pumplichtquelle, Pumpfaser
- 9 Faserkoppler, Wellenlängenmultiplexer

- 10a 10f Spleiße
- 11 optischer Isolator
- 12 Detektionseinheit
- 13 Polarisationskontrolle
- 14, 14a, 14b Analysator, Faserpolarisator
- 15 Detektor, Photodiode
- 16 Signalleitung
- 17 Auswerteelektronik
- 18 Frequenzfilter
- 19 Frequenzzähler
- 20 Summierer
- 21a, 21b 0°, 45° Spleiße
- 22 polarisationserhaltender Faserkoppler
- 23 Wellenlängendemultiplexer
- 24 Mehrkanal-Detektor
- 25 Gehäuse
- 26 Öffnung
- 27a-27c Druckkammern, Gehäuseabteile
- 27a, 27b Innenkapillare
- 28a-28d druckdichte Faserdurchführungen
- 29 Faserkabel
- 30 Medium
- 31 Fluid
- 32 Membran
- 33 Frequenzen der Longitudinalmoden
- 34 Reflexionsspektren der Bragg-Gitter
- 35 Zwischenfaser
- c Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- $L_a, L_b, L$  Längen der Sensorfasersegmente
- $L_d$  Länge der laserverstärkenden Faser
- $\lambda_B$  Bragg-Wellenlänge
- $\lambda_1, \dots, \lambda_i$  Emissionswellenlängen
- $\nu$  Frequenz des Faserlasers
- $\nu_B$  Bragg-Frequenz
- $\Delta\nu_B, \Delta\nu_B^{(1)}, \Delta\nu_B^{(2)}$  Bandbreiten der Faser-Bragg-Gitter
- $\Delta\nu_0, \Delta\nu_0'$  Frequenzabstand
- $\Delta\nu_f$  fundamentale Schwebungsfrequenz
- $n_a, n_a', n_b, n_b'$  effektive Brechungsindizes
- $\Delta n_a, \Delta n_b$  Doppelbrechungen
- i, m Indizes
- p Druck
- T Temperatur
- R (normierte) Bragg-Reflektivität

#### Patentansprüche

1. Faserlaser-Drucksensor (1), insbesondere geeignet zur Druckmessung in Erdölbohrlöchern, umfassend eine Pumplichtquelle (8), Zuführungsfasern (7a-7d), einen Faserlaser (2), der eine laserverstärkende Faser (3) und mindestens zwei Endreflektoren (4a, 4b) aufweist, eine Detektionseinheit (12) und eine Auswerteelektronik (17), dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Endreflektoren (4a, 4b) eine Sensorfaser (5, 5a, 5b) mit einer nicht rotationsymmetrischen Struktur angeordnet ist.
2. Faserlaser-Drucksensor (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensorfaser (5, 5a, 5b)
  - a) einen elliptischen Kern, eine "bow-tie"-Struktur, eine "panda"-Struktur, eine "side-hole"-Struktur, eine "D-shape"-Struktur, eine elliptische Faserhülle oder eine teilweise angeschliffene Faserhülle aufweist und
  - b) unmittelbar als ganzes oder teilweise einem zu messenden Druck ausgesetzt ist.
3. Faserlaser-Drucksensor (1) nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß
  - a) die Sensorfaser (5, 5a, 5b) genau zwei Polari-

- sationsmoden oder genau zwei Raummoden trägt,  
 b) die Sensorfaser (5, 5a, 5b) aus genau zwei identischen Fasersegmenten (5a, 5b) besteht, die zueinander um  $90^\circ (\pm 30^\circ)$  oder  $0^\circ (\pm 30^\circ)$  verdreht sind und  
 c) insbesondere eine Zwischenfaser (35) zwischen den Fasersegmenten (5a, 5b) angeordnet ist.
4. Faserlaser-Drucksensor (1) nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) die Endreflektoren Faser-Bragg-Gitter (4a, 4b) sind und  
 b) insbesondere die Bragg-Wellenlänge ( $\lambda_B$ ) ein Maß für die Temperatur ist.
5. Faserlaser-Drucksensor (1) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) die Faser-Bragg-Gitter (4a, 4b) direkt in die laserverstärkende Faser (3) und/oder in die Sensorfaser (5, 5b) geschrieben sind und  
 b) insbesondere eines der Faser-Bragg-Gitter (4a, 4b) mit größerer Bandbreite, bevorzugt  $\Delta v_B^{(1)} = 0,6 \text{ nm}$  und  $\Delta v_B^{(2)} = 0,2 \text{ nm}$ , gewählt ist.
6. Faserlaser-Drucksensor (1) nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) die Sensorfaser (5, 5a, 5b) zweimodig ist,  
 b) ein Faserpolarisator (14) in oder neben dem Faserlaser (2) angeordnet ist und  
 c) insbesondere die Bragg-Wellenlänge ( $\lambda_B$ ) im Spektralbereich einer verschwindenden Gruppenbrechungsindex-Doppelbrechung der Sensorfaser (5, 5a, 5b) gewählt ist.
7. Faserlaser-Drucksensor (1) nach einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) die Pumplichtquelle (8), der Faserlaser (2) und die Detektionseinheit (12) durch einen vorzugsweise wellenlängenselektiven Faserkoppler (9) in optischer Verbindung stehen,  
 b) die Detektionseinheit (12) einen Analysator (14), einen Detektor (15) und insbesondere eine Polarisationskontrolle (13) umfaßt und  
 c) die Auswerteelektronik (17) einen Frequenzfilter (18) und einen Frequenzzähler (19) aufweist.
8. Faserlaser-Drucksensor (1) nach Anspruch 7, Merkmale a) und c), dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) die Detektionseinheit (12) einen polarisationserhaltenden Faserkoppler (22) mit zwei unter  $0^\circ$  und  $45^\circ$  orientierten Analysatoren (14a, 14b) und zwei Detektoren (15a, 15b) aufweist und  
 b) die Auswerteelektronik (17) einen Summierer (20) umfaßt.
9. Faserlaser-Drucksensor (1) nach einem der Ansprüche 1-8, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) mehrere Faserlaser (2) unterschiedlicher Emissionswellenlängen mit einer Pumplichtquelle (8) und einer Detektionseinheit (12) in optischer Verbindung stehen,  
 b) die Detektionseinheit (12) einen Wellenlängendemultiplexer (23) und einen Mehrkanal-Detektor (24) aufweist und  
 c) eine Mehrkanal-Auswerteelektronik (17) vorgesehen ist.
10. Faserlaser-Drucksensor (1) nach einem der Ansprüche 1-9, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) ein Faserlaser (2) in einem druckfesten Gehäuse (25) mit mehreren Druckkammern (27a-27c) und druckdichten Faserdurchführungen (28a-28d) montiert ist und  
 b) eine erste Druckkammer (27c), die ein Meßfasersegment (5a; 5b) der Sensorfaser (5) enthält, in

- direktem Druckaustausch mit dem umgebenden Medium (30) steht.
11. Faserlaser Drucksensor (1) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß  
 a) in einer zweiten Druckkammer (27a) ein Faser-Bragg-Gitter (4a) und die laserverstärkende Faser (3) montiert sind,  
 b) in einer dritten Druckkammer (27c) ein Faser-Bragg-Gitter (4b) und ein Fasersegment (5b) der Sensorfaser montiert sind und  
 c) insbesondere die zweite und dritte Druckkammer (27a, 27c) Innenkapillare (27a, 27c) mit druckdichten Faserdurchführungen (28a-28d) sind.
12. Faser-Laser Sensor (1), insbesondere geeignet zur Messung von Dehnungen oder Temperaturen, umfassend eine Pumplichtquelle (8), Zuführungsfasern (7a-7d), einen Faserlaser (2), der eine laserverstärkende Faser (3) und mindestens zwei Endreflektoren (4a, 4b) aufweist, eine Detektionseinheit (12) und eine Auswerteelektronik (17), dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Endreflektoren (4a, 4b) eine doppelbrechende, bevorzugt zweimodige Sensorfaser (5, 5a, 5b) angeordnet ist.

---

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

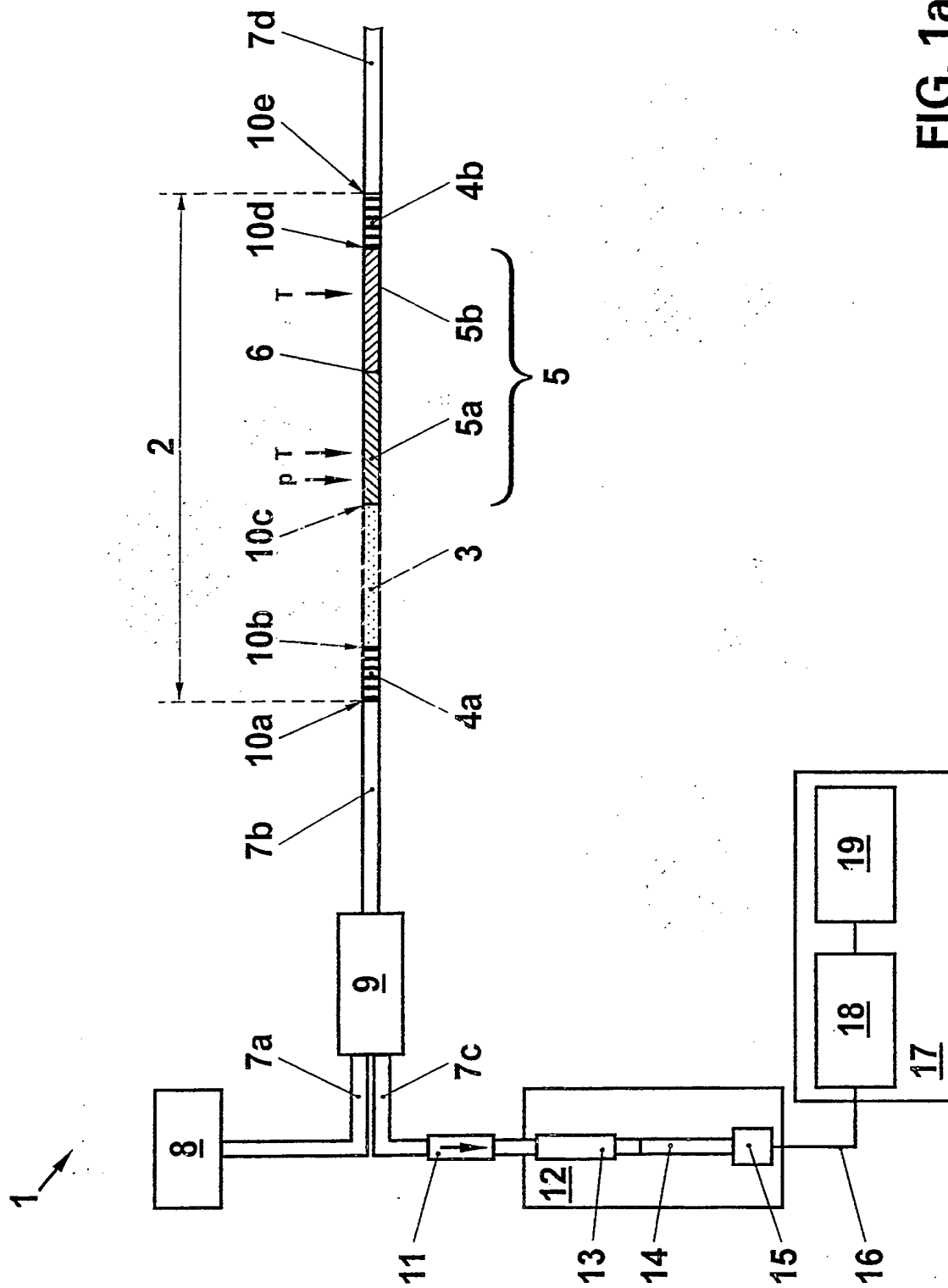


FIG. 1a

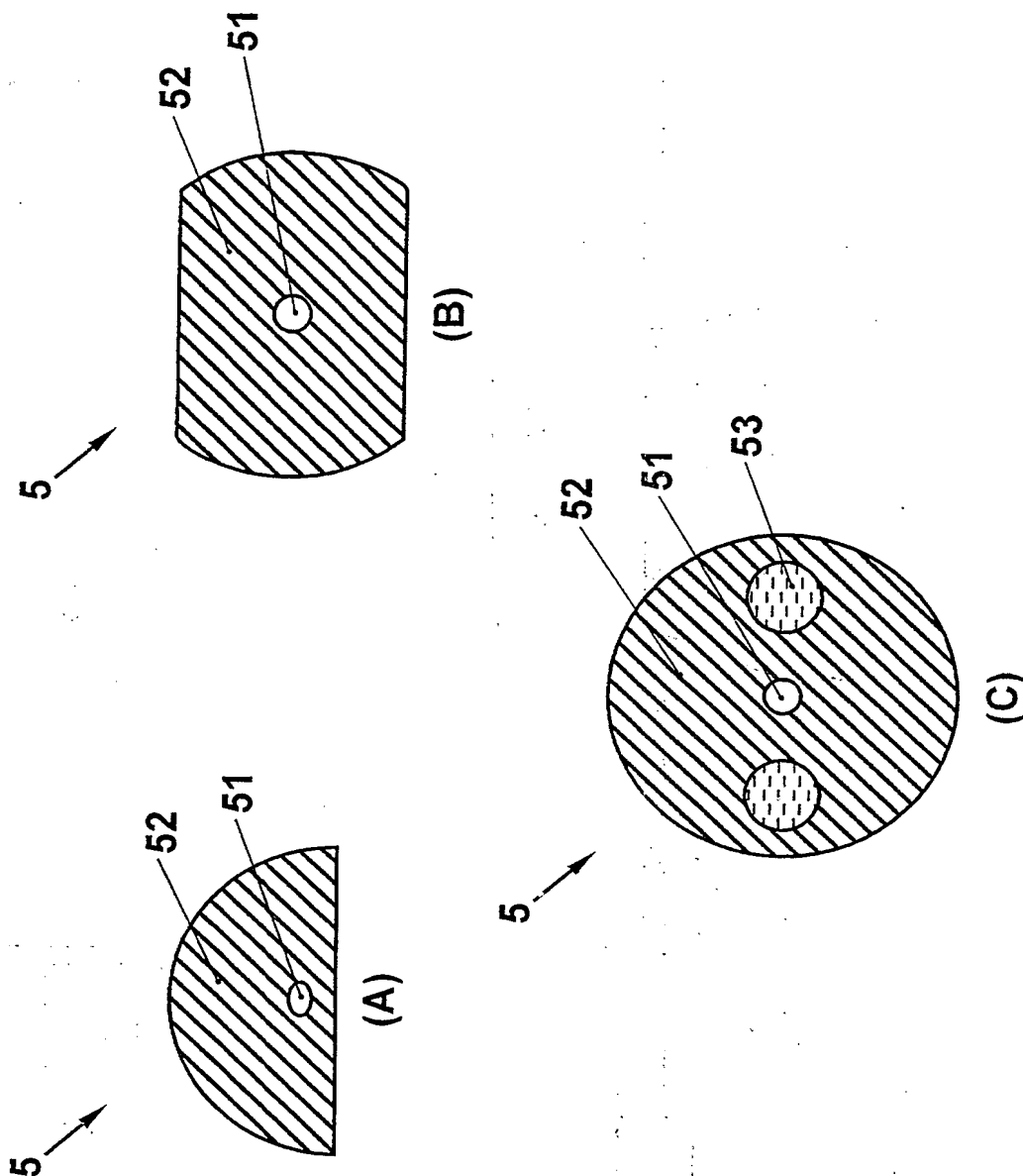


FIG. 1b

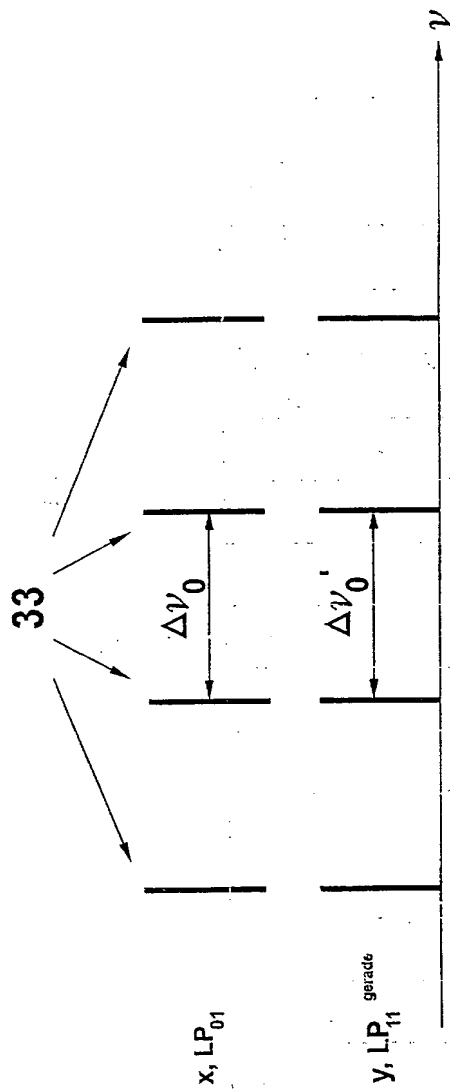


FIG. 2a

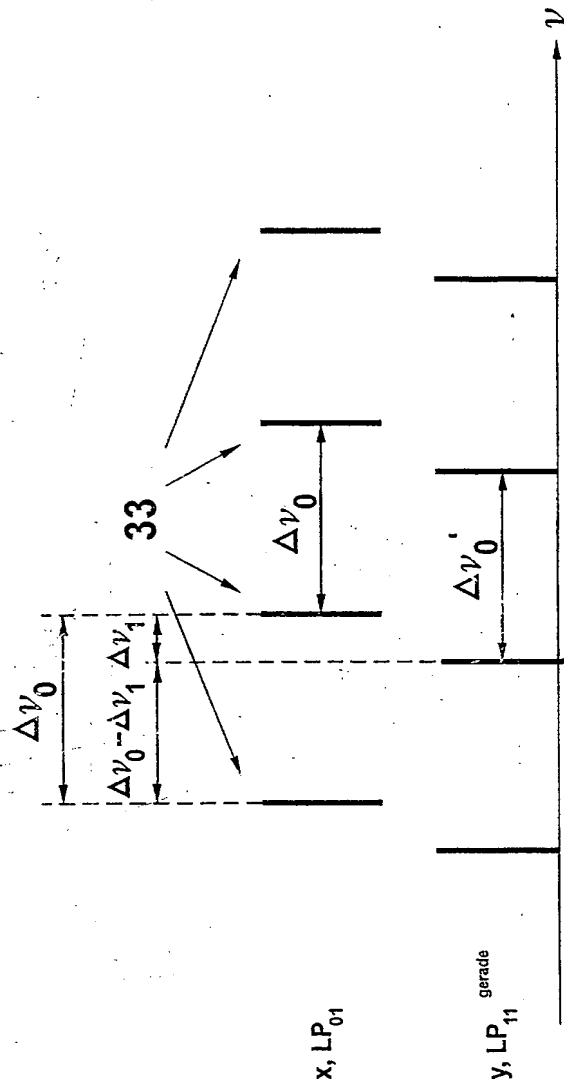


FIG. 2b



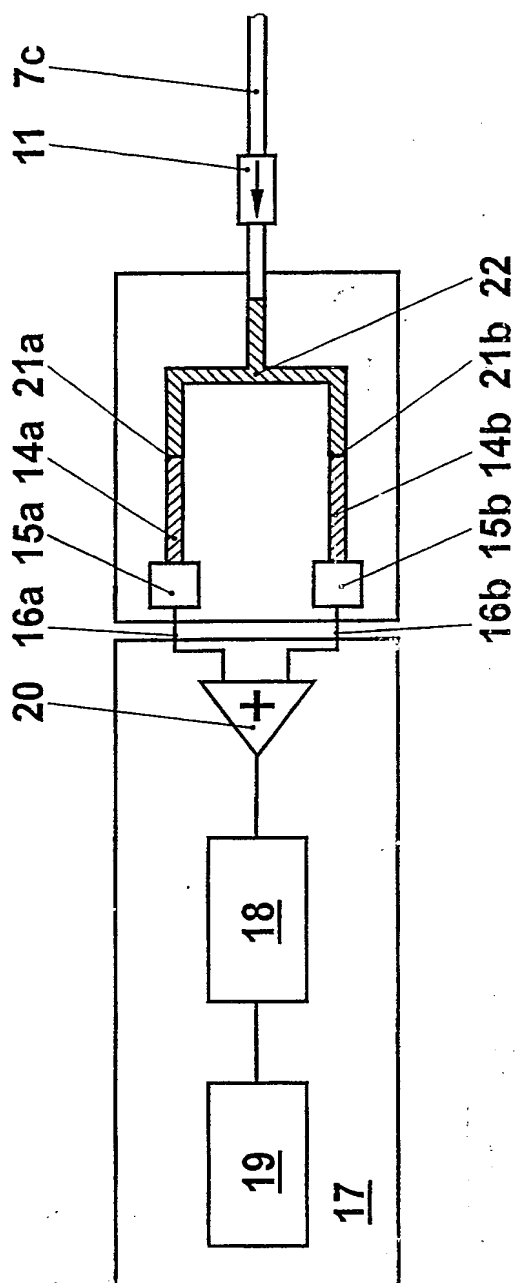


FIG. 3



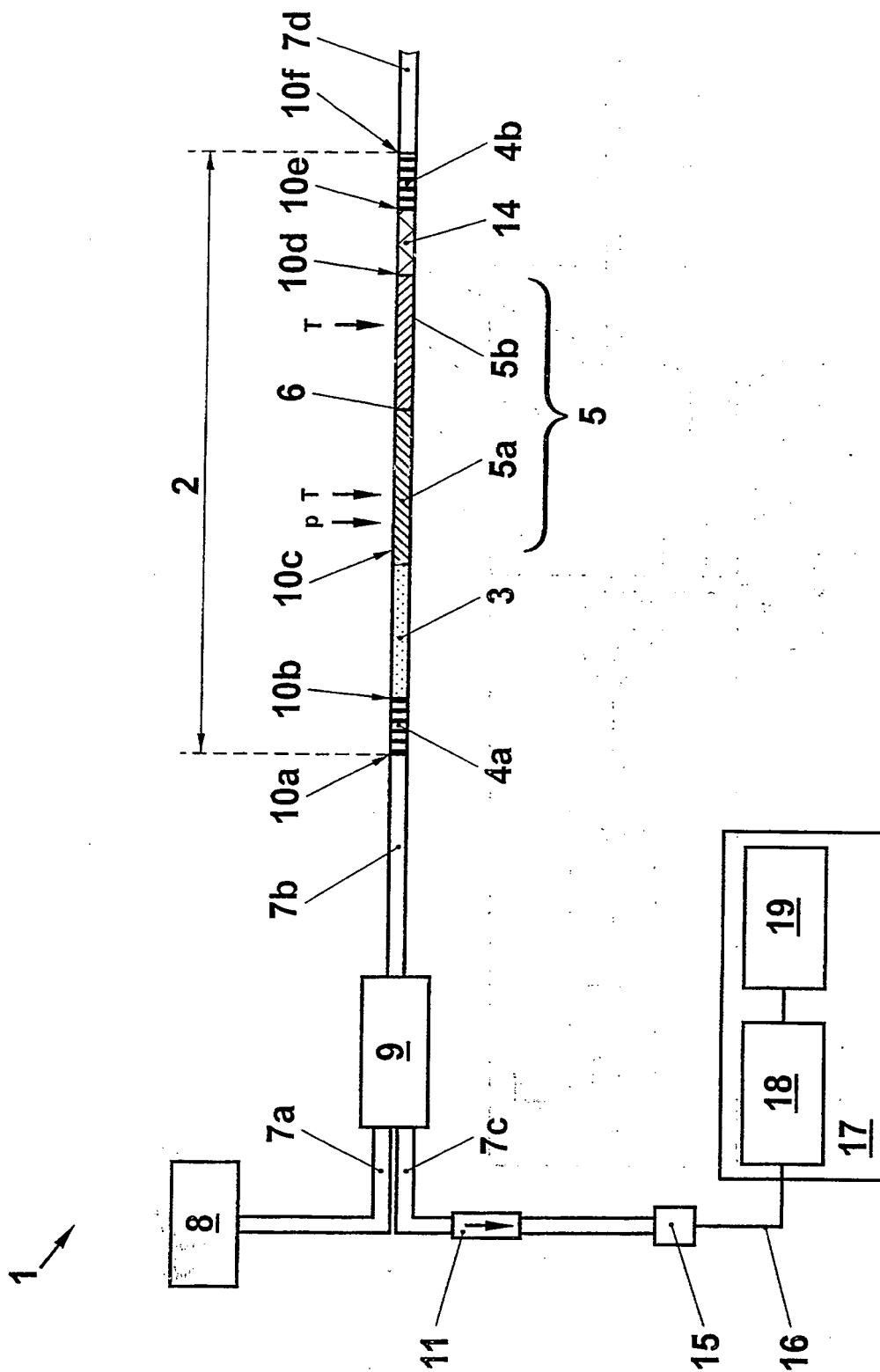


FIG. 4

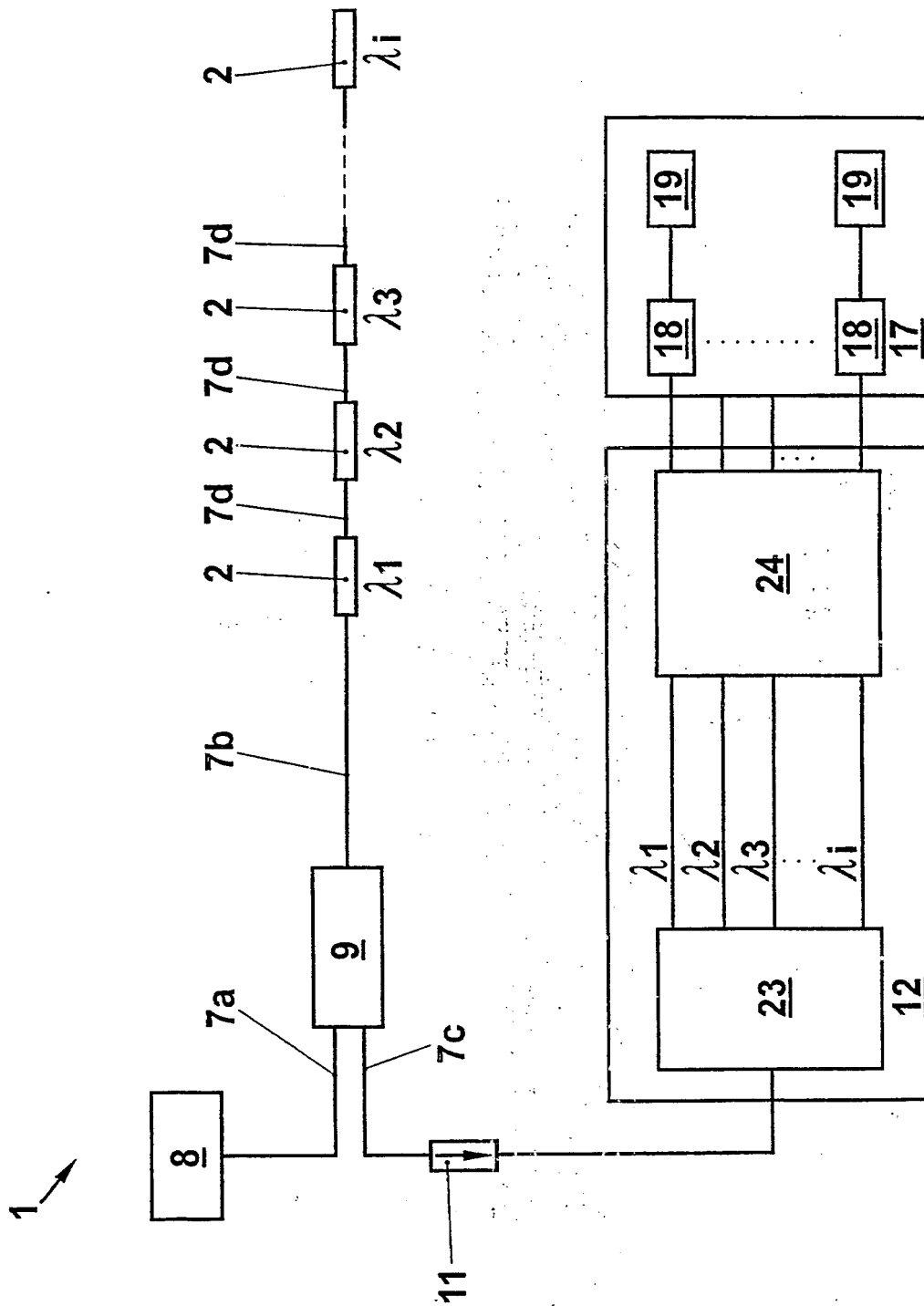


FIG. 5

2

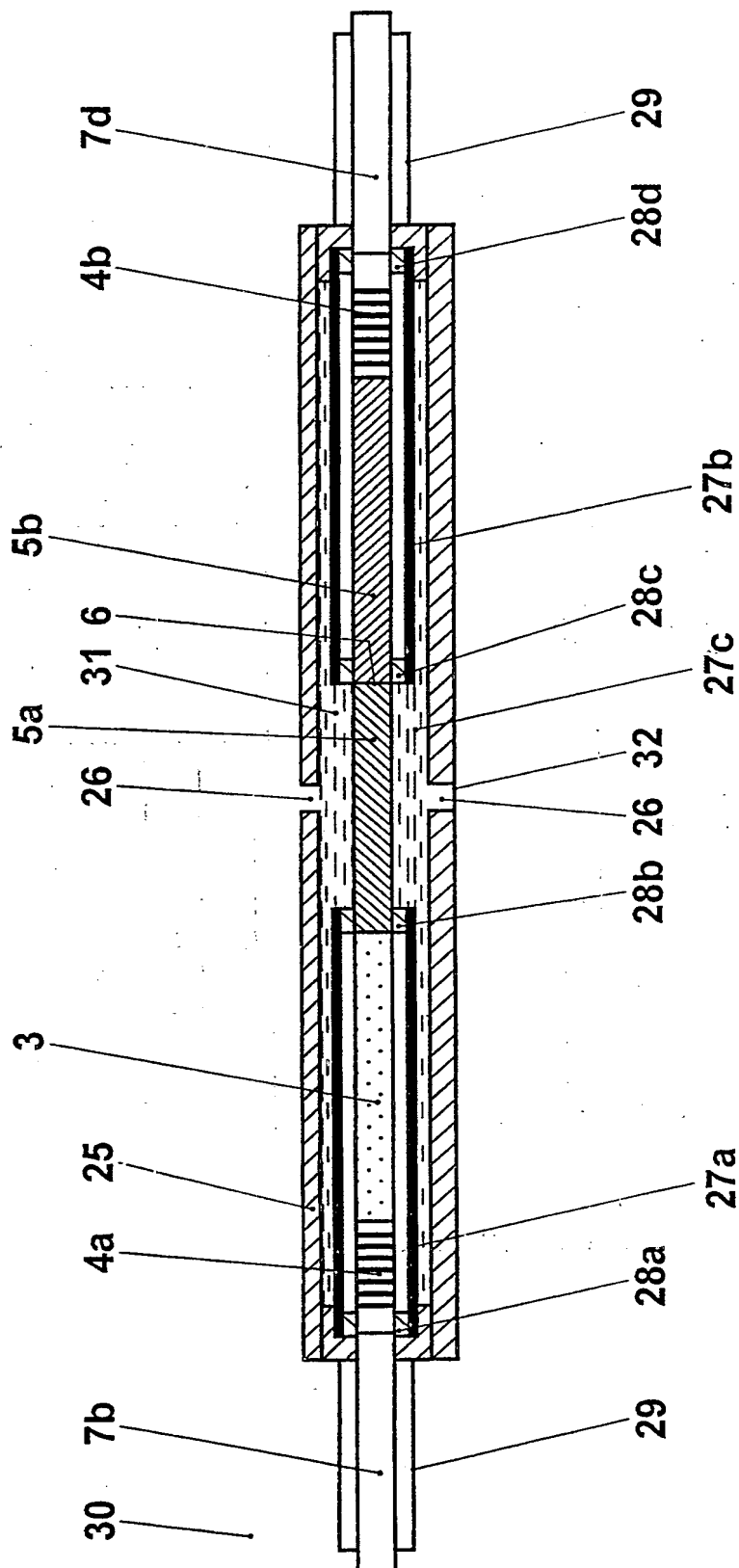


FIG. 6

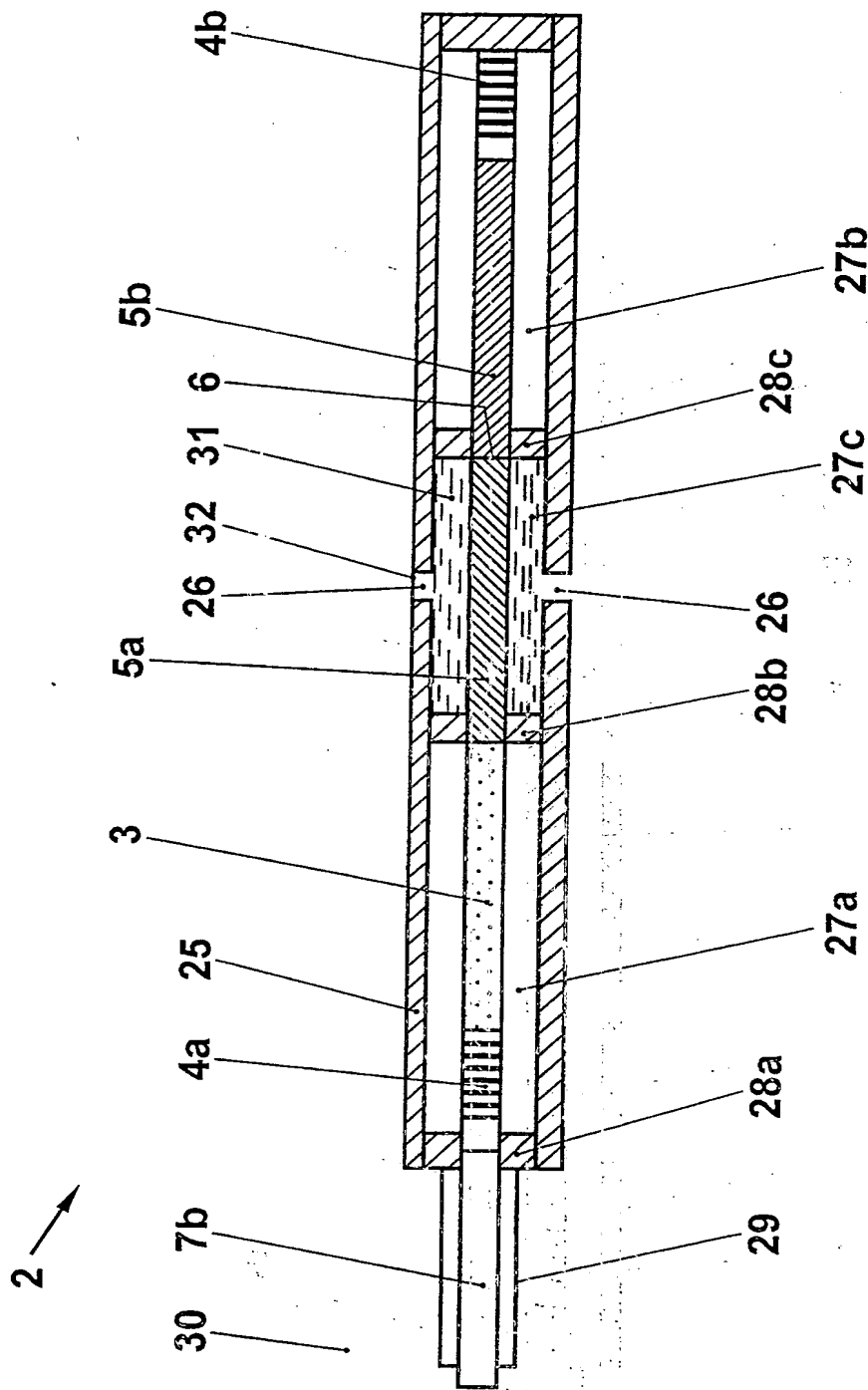


FIG. 7

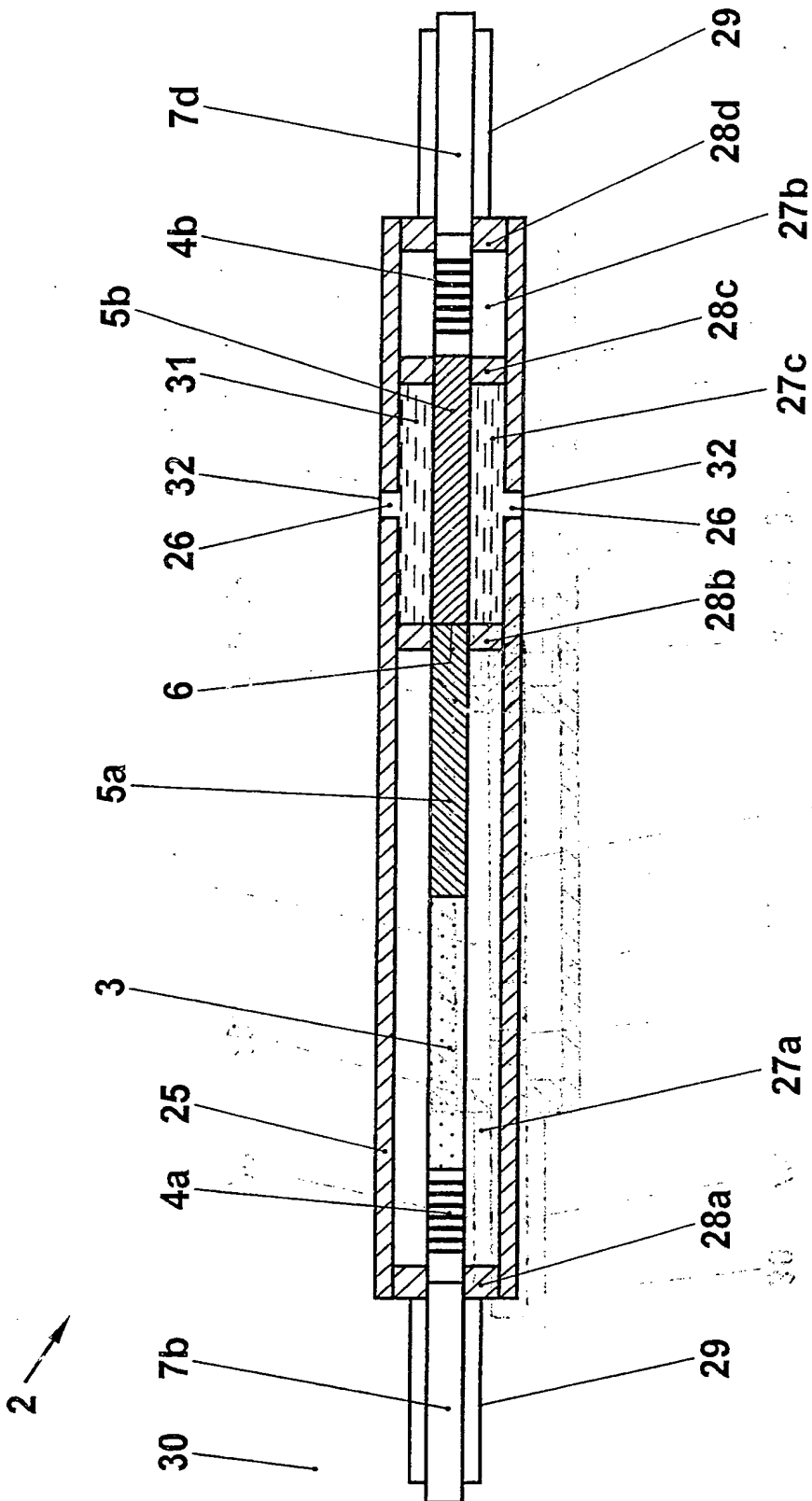


FIG. 8

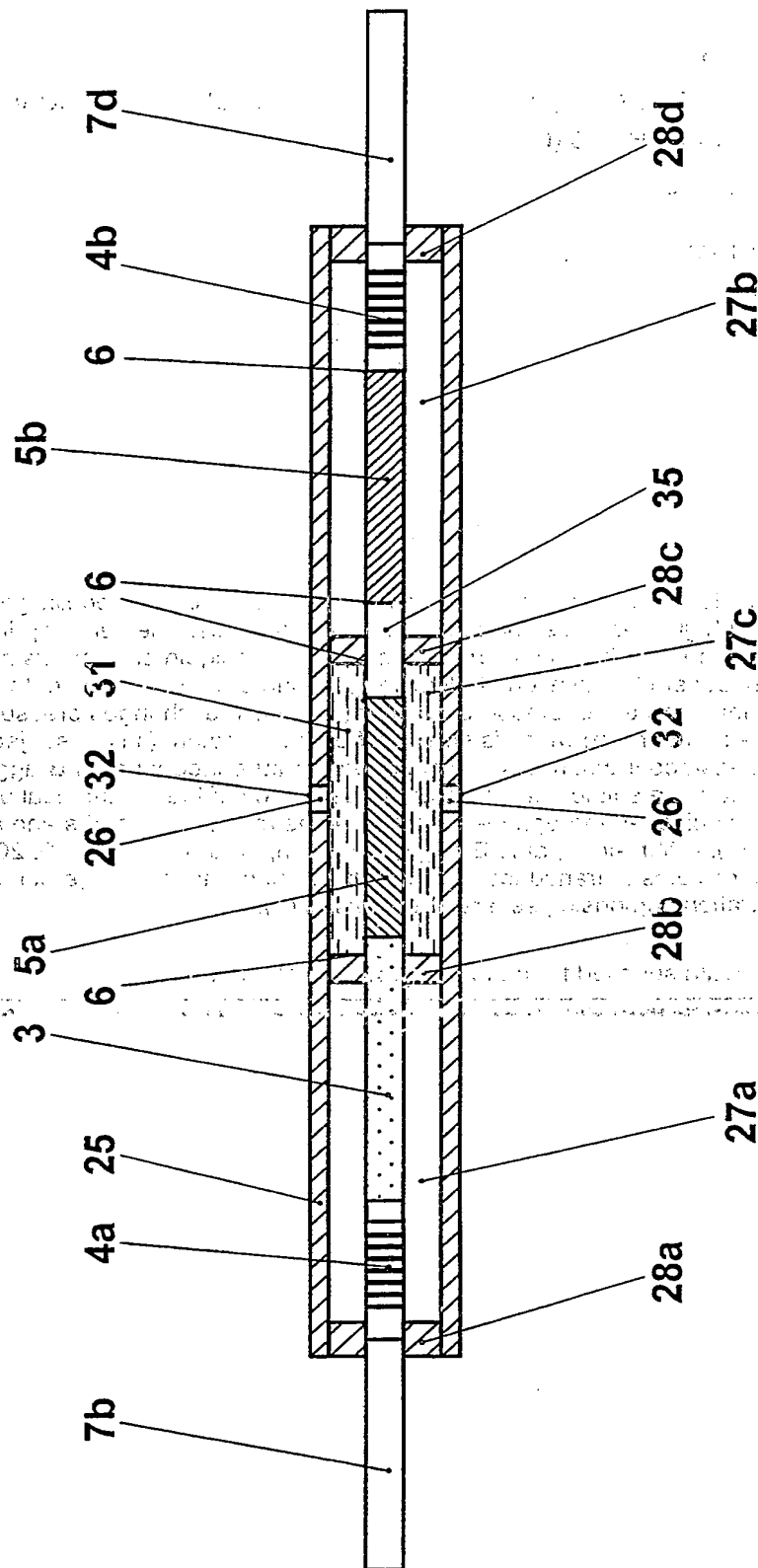


FIG. 9